

## 공동 광자감쇠 분광학에서의 편광 의존성

### Polarization dependence on Cavity Ringdown Spectroscopy

김재완, 한재원

한국표준과학연구원 양자연구부

jwkim@kriss.re.kr

상자성을 갖는 분자에 대한 분광학 연구에서는 제만(Zeeman) 효과로 생기는 이색성을 이용한 magnetic rotation spectroscopy (MRS)가 널리 사용되고 있다.<sup>(1)</sup> MRS가 일반적인 흡수 분광법에 비해 더 민감한 측정을 할 수 있기는 하지만 사용하는 편광기의 extinction ratio에 의해 감도가 한정된다. MRS의 감도를 높이는 방법으로는 광경로를 길게 만드는 것을 고려할 수 있다. 일반적으로 공진기 광자감쇠 분광학 (Cavity Ring-Down Spectroscopy, CRDS)은<sup>(2)</sup> 높은 반사율을 갖는 거울을 사용해서 수 km 이상의 광경로를 만들기 때문에 감도가 높다. 그러므로 CRDS 와 MRS의 장점을 결합하면 상자성 분자에 대해 더욱 민감한 분광법을 확보할 것이 쉽게 예상된다. 빛이 거울에서 반사하면 미소한 복굴절 효과로 편광이 변하게 된다.<sup>(3)</sup> 따라서 CRDS와 같이 많은 회수의 반사를 거듭하는 경우라면 반사에 의해 생기는 전체적인 편광의 변화는 무시할 수 없을 수도 있다. 본 연구에서는 거울의 복굴절과 매질의 이색성 (magnetic circular dichroism)등이 있는 경우 광자감쇠 공동에서 좌·우 원편광의 손실을 계산하였다. 산소 분자 제만 갈라지기(splitting)를 측정하여 계산결과를 확인하였으며 이때 편광에 따른 미분 신호의 감도는  $1.0 \times 10^{-9} \text{ cm}^{-1}$ 로 측정되었다.

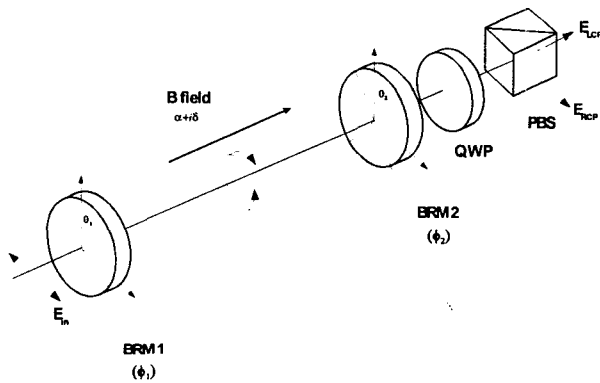


Fig. 1. Principle and optical layout for the polarization dependent cavity ringdown spectroscopy. BRM is a mirror with linear birefringence  $\varphi$ , QWP is a quarter waveplate, PBS is a polarization beam splitter, SA and FA are slow and fast axis, respectively.

제만효과에 의해 나타나는 이색성은 좌·우 원편광 상태에 따라 각각의 흡수계수가 결정된다. 그림 1과 같은 광학계에서 공동 내부를 왕복하는 좌·우 원편광의 전기장은 매질에서의 이색성( $\alpha$ )과 복굴절 (magnetic circular birefringence,  $\delta$ )을 겪고 거울에서 반사하면서 선형 복굴절( $\varphi$ )을 겪게 된다. 선형복굴절의 광축이 입사광과 이루는 각도를  $\theta$  라고 하면 공동을 왕복할 때 전기장의 변화는 Jones 행렬을 이용해서 계산하면

$$M = r_1 r_2 e^{-2(\alpha_0 + i\delta_0)} \begin{bmatrix} e^{-2\alpha - i2\delta} \cos \varphi_1 \cos \varphi_2 - e^{2i(\theta_1 - \theta_2)} \sin \varphi_1 \sin \varphi_2 & ie^{2i\theta_1} \cos \varphi_1 \sin \varphi_2 + ie^{2\alpha} e^{2i\delta} e^{2i\theta_1} \sin \varphi_1 \cos \varphi_2 \\ ie^{-2\alpha} e^{-2i\delta} e^{-2i\theta_1} \sin \varphi_1 \cos \varphi_2 + ie^{-2i\theta_2} \cos \varphi_1 \sin \varphi_2 & e^{2\alpha + i2\delta} \cos \varphi_1 \cos \varphi_2 - e^{-2i(\theta_1 - \theta_2)} \sin \varphi_1 \sin \varphi_2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

가 된다. 거울면에서의 복굴절  $\phi$ 가 충분히 작은 경우에는 행렬  $M$ 의 비대각성분을 섭동항으로 하여 광자 감쇠신호를 쉽게 구할 수가 있다. 간단한 계산에 의해 선편광이 입사되었을 때 공동을 왕복하면서 좌·우 원편광된 빛이 겪는 손실차이는 다음과 같다.

$$\Lambda^1 - \Lambda^2 = 2\{4\alpha + (e^{-2\alpha} + e^{2\alpha})\sin[2(\theta_1 + \delta)]\sin\phi_1 \cos\phi_2 + 2\sin(2\theta_2)\cos\phi_1 \sin\phi_2\} \quad (2)$$

위 식의 두 번째 항은 거울의 복굴절에 의해 생긴 것으로 분광기의 감도의 한계를 결정하는 요소로 작용하지만 거울을 회전시켜  $\theta$ 를 조절하여 최소로 만들 수 있다. 입사광의 파장을 변화 시켜서 분광선을 측정할 때 두 번째 항은 일정한 값을 가지므로 곡선맞춤을 통해 쉽게 제거가 가능하다. 두 편광 성분의 손실을 동시에 측정해 차이를 구하므로 공통된 잡음이 제거되므로 보통의 CRDS 보다 감도가 향상된다.

계산 결과를 검증하기 위해 0.1 Torr, 50 Gauss에서 산소  $b^1\Sigma_g^- - X^3\Sigma_g^-(0,0)$  밴드의 PP(13) 천이를 측정하였다. 좌우원편광 광자감쇠신호로부터 구한 흡수 분광선을 그림 2에서 보여주고 있다. 거울에서의 복굴절과 제만 갈라지기로 인해 두 편광성분이 분리되었다. 그림에서 복굴절에 의한 손실은 두 편광성분의 차인 실선에서 일정한 값 ( $2.39 \times 10^8 \text{ cm}^{-1}$ ) 만큼 offset을 주고 제만 갈라지기는 흡수선의 미분형태를 나타내고 있다. 자기장을 변화시키며 측정한 제만 갈라지기는 (그림 3) 자기장의 세기에 비례하고 곡선맞춤에 의해 구한 기울기는 0.144 MHz/Gauss였다.

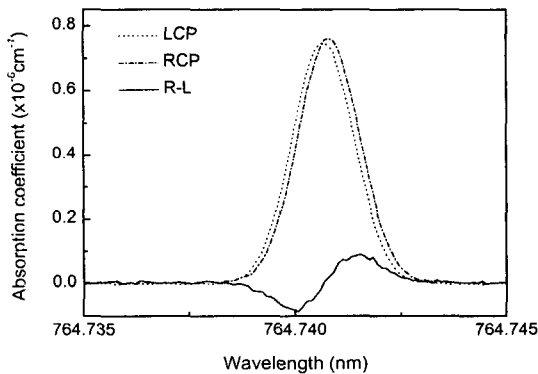


Fig. 2. The polarimetric differential spectrum (solid line) of PP(13) transition of oxygen A-band. The LCP (dotted line) and RCP (dash dot line) are spectra measured with left and right circularly polarized light, respectively.

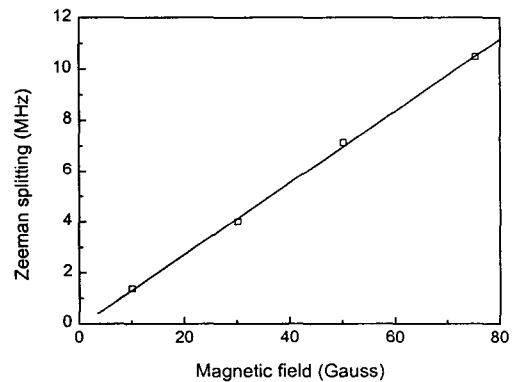


Fig. 3. Plot of the Zeeman splitting as a function of applied magnetic field. The solid line is a least squares straight-line fit to the data. The resultant Zeeman splitting is 0.144 MHz/Gauss.

#### 참고 문헌

- 1 F. J. Brecha, L. M. Pedrotti, and D. Krause, "Magnetic rotation spectroscopy of molecular oxygen with a diode laser," J. Opt. Soc. Am. B 14, 1921 (1997).
- 2 A. O'Keefe and D. A. G. Deacon, "Cavity ring-down optical spectrometer for absorption measurements using pulsed laser sources," Rev. Sci. Instrum. 59, 2544-2551 (1988).
- 3 Jae Yong Lee, Hai-Woong Lee, Jae Wan Kim, Yong Shim Yoo, and Jae Won Hahn, "Measurement of ultralow supermirror birefringence by use of the polarimetric differential cavity ringdown technique," Appl. Opt. 39, 1941 (2000).